

Aplicación de la metodología de caudales básicos de mantenimiento en la Cuenca Media del río Tuluá - Subcuenca del Río Cauca

An Application of the Maintenance Basic-Stream Method to the "Tulua" River Basin – "Cauca" River Sub-Basin Area

Lina Mabel Castro Heredia

Ingeniera civil, magíster en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Docente investigador de la Universidad del Valle. Cali, Colombia.

linacahe@yahoo.com

Yesid Carvajal Escobar

Ingeniero agrícola, magíster en Suelos y Aguas, doctor en Hidráulica y Medio Ambiente. Docente asociado de la Universidad del Valle. Cali, Colombia.

yecarvaj@univalle.edu.co

Guillermo Céspedes López

Ingeniero agrícola. Investigador de la Universidad del Valle. Cali, Colombia.

gmcespedes@gmail.com

Clasificación del artículo: Investigación (conciencias)

Fecha de recepción: 23 de marzo de 2011

Fecha de aceptación: 29 de agosto de 2011

Palabras clave: Año hidrológico, caudal ambiental, caudal ecológico, caudal básico de mantenimiento, variabilidad intranual, variabilidad interanual.

Keywords: Year hydrological, environmental flow, ecological flows, base flow maintenance, inter annual variability, intra annual variability.

RESUMEN

La humanidad ha usado los recursos hídricos de diferentes formas (agricultura, consumo urbano, actividades industriales, entre otros), convirtiéndolo en un motor de desarrollo económico de las naciones, pero pasando por alto el valor de los ecosistemas que mantienen el medio acuático. Los

caudales ambientales forman parte de una gestión sostenible del sistema hídrico centrado en el mantenimiento de un buen estado ecológico.

El propósito de este trabajo consistió en desarrollar y aplicar una metodología para la determinación del Régimen de Caudal Ambiental (RQA) en la Cuenca Media del río Tuluá, como cuenca

piloto en la determinación del RQA en Colombia. Para ello se recolectó información hidrológica, hidráulica, de calidad de agua y de derivaciones y aportes de agua, se usó el modelo HEC RAS, en este caso, para simular el comportamiento hidráulico de la corriente superficial para posteriormente, contrastar la información con un modelo o información asociada a aspectos ecológicos y ambientales del RQA propuesto y verificar las condiciones de habitabilidad, además de evaluar el RQA con los usos consuntivos de la cuenca. La metodología resultó ser consistente para el tramo estudiado, mostrando un RQA variable y conveniente a lo largo del año, con las condiciones de habitabilidad impuestas.

ABSTRACT

Mankind has used water in different ways (agriculture, urban consumption, industrial activities, etc), making it an engine of economic development of

nations, but ignoring the value of the ecosystems that sustain the aquatic environment. Environmental flows are part of a sustainable water system management focused on maintaining a good ecological status. The purpose of this work was to develop and implement a methodology for determining the environmental flow regime (RQA) in the middle of the river basin Tuluá, as a pilot basin in the determination of RQA in Colombia. This information was collected hydrological, hydraulic, water quality and water intake and referrals, we used the HEC RAS model, in this case to simulate the hydraulic behavior of the surface current to later verify the information with a model or information associated with ecological and environmental aspects of the proposed RQA and verify the conditions of habitability, and to assess the RQA with consumptive uses of the basin. The methodology was consistent for the section studied, showing a variable RQA and convenient throughout the year, with living conditions imposed.

* * *

1. INTRODUCCIÓN

El agua es vital para la vida humana y para el desarrollo económico de las naciones desde tiempos remotos, es así como muchas ciudades y civilizaciones han crecido cerca de los ríos, haciendo de estos el motor de desarrollo, mediante su empleo en la agricultura, la industria, y generación de energía. Pero más allá de la utilidad económica del agua en estos sectores, los ríos, lagos, humedales y acuíferos desempeñan funciones clave, tanto para la biosfera, como para el sustento y cohesión de las comunidades, al tiempo que representan bienes comunes naturales que marcan la identidad de territorios y pueblos.

La mayoría de los ríos en el mundo han sido modificados en su estructura, forma, composición y funcionamiento, lo que ha provocado disminución excesiva de caudales, modificación en las magnitudes, períodos y frecuencias de las crecientes, prolongación de estiajes y reducción de crecidas periódicas, lo que ha provocado cambios en la morfología fluvial, erosión, contaminación e eutrofización, cambios del transporte de sedimentos,

en definitiva, graves alteraciones ecológicas, físicas y químicas, además de la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos.

De acuerdo con Carvajal-Escobar [1], los ríos son aún concebidos como conductos que transportan agua a modo de canales o tuberías, y que sirven de receptores de las aguas residuales, ejerciendo mayor presión sobre el recurso hídrico. Por tanto, la búsqueda de la sostenibilidad exige cambios profundos en la concepción de la naturaleza, de actitudes y modos de vida. Exige una nueva cultura del agua que reconozca los múltiples valores emocionales, culturales, ambientales y económicos, incluyendo enfoques éticos basados en principios de equidad y sustentabilidad.

Durante las dos o tres últimas décadas, las constantes intervenciones sobre los recursos hídricos han generado una creciente preocupación ambiental sobre las consecuencias negativas que esas intervenciones han generado. Estas preocupaciones han ido ganando adeptos, dentro y fuera de nuestras fronteras, reconociendo que el mantenimiento de los ecosistemas de agua dulce, es un objetivo

legítimo que debería ser considerado entre las distintas demandas por agua dulce [2]. Esta preocupación se refleja claramente en la exigencia de la sociedad (cada vez mayor) en todo lo que respecta a la conservación del medio natural y al empleo sostenible de los recursos. Para hacer frente a esas exigencias, los distintos gobiernos han intentado plasmar en sus políticas sectoriales, a través de las disposiciones legales promulgadas por las distintas administraciones y de los compromisos adquiridos en la adhesión a múltiples convenios internacionales (Convenio de Diversidad Biológica, Man and Biosphere, Ramsar, entre otros) [3].

La creciente demanda social por un manejo sostenible de los recursos hídricos ha impulsado a nivel mundial el desarrollo de metodologías para definir un caudal ambiental, ecológico, de mantenimiento o mejor llamado “Régimen de Caudal Ambiental - RQA” (existen diversas denominaciones dependiendo del objetivo ambiental que se persiga), que debe permanecer en un río después de un aprovechamiento hídrico. La definición de este caudal se hace a partir de variables hidráulicas, hidrológicas, biológicas, ecológicas, entre otras. Para el cálculo de caudales ambientales (QA), existen diversas metodologías descritas por varios autores [4] - [9]. En este caso, se presenta la aplicación del método de los caudales básicos de mantenimiento, desarrollado por Palau [10], considerado como un método hidrológico con aspectos hidráulicos y biológicos (habitabilidad) [9].

La aplicación de metodologías hidrológicas para establecer QA y RQA, no es en muchos casos la más adecuada, porque representa valores constantes y fueron desarrolladas para regímenes hidrológicos y especies acuícolas (salmónidos) diferentes a las del país. Sin embargo, su uso es popular por la facilidad de aplicación en la planificación del recurso hídrico y porque permite hacer regionalización en zonas con escasa información. En Colombia, la aplicación de este tipo de metodologías puede surgir como un punto de partida en el estudio de caudales ambientales dadas las limitaciones presupuestales y de información local disponible.

Este documento presenta, 1) las bases conceptuales del método de caudales básicos de mantenimiento, 2) la descripción de la zona de estudio,

3) el análisis exploratorio, de consistencia, de tendencias, de homogeneidad, etc, y 4) la aplicación de la metodología de caudales básicos de mantenimiento y la posterior estimación de los rangos de variación de los caudales para definir el régimen de caudal ambiental (RQA). También se realizó modelación en HEC RAS del RQA estimado, verificando las condiciones de habitabilidad y los usos consuntivos actuales del río. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos, incluyendo, conclusiones y recomendaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caudales básicos de mantenimiento (QBM)

Palau [11] define el “Caudal básico de mantenimiento” como el caudal que hay que dejar en un río aguas abajo de cada aprovechamiento de regulación o derivación para mantener un nivel admisible de desarrollo de la vida acuática. El problema está en definir cuál es ese “nivel admisible de desarrollo”. Como primera aproximación, se puede considerar que un nivel admisible tendrá que estar dentro del rango de variabilidad natural del sistema considerado (río) y lo más alejado posible de eventos hidrológicos con baja probabilidad de ocurrencia. El nivel admisible para el desarrollo de la vida acuática se logra con un “caudal de mantenimiento” representativo que se encuentre entre los valores mínimos y medios de la serie hidrológica estudiada, afirmación consistente con los planteamientos de Richter et ál [12], [13], Barron et ál [2] entre otros.

La variación hidrológica tiene un papel importante en la estructuración de la diversidad biótica en los ecosistemas de los ríos, ya que controla las condiciones de hábitat dentro del cauce del río, llanuras aluviales y las zonas hiporréicas (aguas subterráneas afectadas por la corriente). De esta forma, se reconoce que la variación hidrológica tiene un factor importante que favorece el hábitat de los ecosistemas ribereños. También se reconoce que tanto el rango de variación natural intra e interanual de los regímenes hidrológicos como las características asociadas de tiempos, duración, frecuencia y nivel de cambio, son fundamentales para sustentar

la biodiversidad nativa y la integridad de los ecosistemas acuáticos [13].

En el método del Caudal básico de mantenimiento, la fuente primaria de información es la serie hidrológica temporal, porque se parte del supuesto que contiene toda la información física y biológica del medio acuático, dado que todas las variables de un tramo del río dependen intrínsecamente del caudal circulante [11]. El cálculo del RQA, involucra primero el cálculo del caudal base a partir de la técnica de "medias móviles" aplicadas sobre intervalos de datos de amplitud creciente. Una vez calculado el caudal base (Q_b), se determina un caudal adicional, llamado "caudal de acondicionamiento", el cual se considera un suplemento al Q_b , que se calcula a partir de la simulación de secciones representativas del tramo objeto de aprovechamiento y a partir de la comprobación del cumplimiento de unas condiciones de conservación predefinidas para el uso específico para el cual se está estimando el RQA. Si el Q_b es insuficiente para cumplir con condiciones de habitabilidad o de calidad del agua, se puede establecer un caudal de acondicionamiento (caudal adicional al Q_b). El Q_b más el caudal de acondicionamiento, definen el caudal de mantenimiento (definido así por el autor [11], [14]). Sobre el caudal se aplica un factor de variabilidad temporal mensual, obteniéndose un régimen de caudales ambientales o de mantenimiento para cada unidad de tiempo definida.

2.2. Zona de estudio

La cuenca del río Tuluá se encuentra ubicada en el centro del departamento del Valle del Cauca – Colombia Fig. 1, tiene una extensión de 91.485 ha de las cuales el 85,1% del área corresponde a la zona de ladera y el 14,9% al valle geográfico del río Cauca o zona plana. Para la aplicación del método del QBM, se utilizaron registros diarios de caudal (1975 - 1995) de la estación Limnigráfica “Mateguadua” ubicada en el Jardín Botánico del municipio de Tuluá y que registra un caudal promedio multianual de $14,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Fig. 1). El agua captada del río Tuluá, se emplea para satisfacer la demanda del acueducto del municipio de Tuluá, el riego de cultivos de caña de azúcar, pastos y abrevaderos de animales principalmente. En total

el caudal derivado desde la estación Mateguadua hasta la desembocadura al río Cauca es de $4,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, que representa el 33 % del caudal promedio multianual.

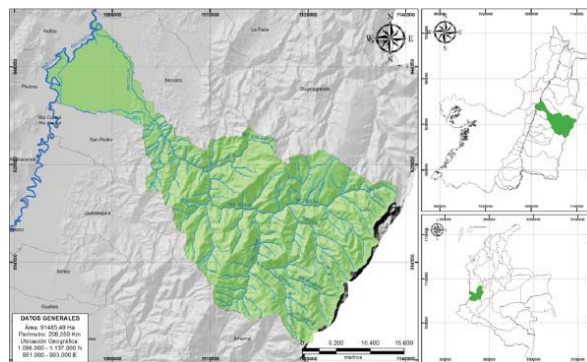


Fig. 1. Localización de la zona de estudio

2.3. Análisis de la información hidrológica

Previo a la aplicación del método del QBM, se procedió a realizar un análisis exploratorio gráfico y cuantitativo [15], con el fin de confirmar la consistencia y homogeneidad de la serie hidrológica utilizada. Los resultados indican que la información utilizada no presenta tendencias ni estacionalidad en sus parámetros estadísticos. El método del QBM es susceptible a la alta variabilidad hidrológica en los registros de caudal, razón por la cual también se realizó un chequeo del coeficiente de variación intranual (CVI) para determinar si la desviación típica era significativa con respecto a la media. Los CVI calculados por año oscilaron entre 0,34 y 0,89, indicando una variabilidad normal en ríos de esta naturaleza, en los cuales es aplicable la metodología.

En el cálculo del caudal básico por el método de las Medias Móviles, es importante determinar el mes de inicio del año hidrológico, ya que puede condicionar el resultado final. Por ello Palau [11] recomienda iniciar el año en un mes que ni contenga el mínimo caudal medio diario anual, ni el caudal medio mensual diario más bajo. Para el caso del río Tuluá, se analizó la frecuencia y distribución de los meses que contenían el mínimo caudal medio en los datos disponibles (1975 - 1995). Desarrollado el proceso, se observó que durante los meses de abril, mayo y junio, no se presentaron caudales mínimos dentro del período de regis-

tro. Para definir en cuál de esos tres meses se debe comenzar el año hidrológico se tuvo en cuenta un fenómeno climático extremo que se presenta cíclicamente en Colombia y que representa los años más secos, el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur, que según Poveda et al [16] empieza en junio y termina en mayo del siguiente año, periodo en el que se desarrolla la fase extrema del Fenómeno de El Niño.

2.4. Cálculo de medias móviles

Una vez definido el año hidrológico, se calcularon las medias móviles (MM) para 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 días consecutivos,

entre los años 1975 y 1995 para la estación limnigráfica Mateguadua. Para definir el caudal básico (Qb), se calcularon las medias aritméticas de los mínimos para cada media móvil, y se determinó el mayor incremento relativo entre cada par de valores consecutivos, siendo el Qb el mayor caudal que define dicho par de valores [17]. En la Tabla 1 se presentan las medias móviles asociadas con caudales, y el incremento relativo en porcentaje. En la Tabla 1 se observa que el incremento relativo fue mayor que las MM de 15 y 40 días. Así mismo, se muestran los resultados del cálculo del régimen de caudal ambiental, a partir de los dos caudales básicos generados con las medias móviles escogidas.

Tabla 1. Incremento Relativo medias móviles. Estación Limnigráfica Mateguadua - Periodo: 1975-1995.

MM	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
Qbásico	4,5	4,6	4,8	5,1	5,4	5,7	5,9	6,2	6,6	6,8	7,1	7,5	7,8	8,2	8,6
%IR		2,8	4,1	5,8	6,4	5,6	3,7	4,6	6,1	4,0	4,4	5,1	4,7	5,1	4,7

*MM: media móvil de tres días consecutivos, cinco días, siete días, etc.

*IR: incremento relativo $(Q_b - Q_{b-1})/Q_{b-1}$

*Q_{básico}: media de los caudales mínimos para los distintos retardos de media móvil escogidos de los años de registro.

2.5. Cálculo del índice de variabilidad

Definido el caudal básico y sin considerar un caudal de acondicionamiento, se procedió a establecer el índice de variabilidad que determina el régimen de caudal ambiental, para ello, existen dos métodos: el primero consiste en dividir el caudal medio mensual multianual por el caudal medio mensual multianual mínimo (Ec. 1), no recomendable en ríos con una alta variabilidad hidrológica, debido a que las diferencias entre el caudal medio del mes más seco y los de los meses más húmedos puede ser significativa. El segundo método atenúa los índices mensuales aplicando la raíz cuadrada del índice de variabilidad (Ec. 2).

$$Q_{mi} = Q_b \left(\frac{Q_{mesi}}{Q_{mesmin}} \right) \quad (1)$$

$$Q_{mi} = Q_b \sqrt{\frac{Q_{mesi}}{Q_{mesmin}}} \quad (2)$$

Donde Q_{min} representa el caudal de mantenimiento (llamado así por el autor del método Palau [11],

pero que aquí se llamara ‘caudal ambiental’), Q_b es caudal base obtenido a partir del cálculo con medias móviles, Q_{mesi} es el caudal mensual multianual del mes en estudio y Q_{mesmin} mesmínimo el caudal mensual multianual mínimo. En otros casos se puede emplear Q_b más el caudal de acondicionamiento, como caudal multiplicador del índice. Para el caso del río Tuluá, se aplicaron los índices normal y modificado como se presenta en la Tabla 2 y se esquematizan en la Fig. 2, donde es posible observar que el índice modificado atenúa la variabilidad intranual propia del río Tuluá. Sin embargo, el índice sin modificar tiene un comportamiento similar a la variación natural del caudal del río.

Tabla 2. Índice de Variabilidad.

Mes	Índice	(Índice) 0,5
ENE	1,56	1,25
FEB	1,40	1,18
MAR	1,49	1,22
ABR	2,07	1,44

MAY	2,35	1,53
JUN	1,76	1,33
JUL	1,51	1,23
AGO	1,14	1,07
SEP	1,00	1,00
OCT	1,70	1,30
NOV	2,34	1,53
DIC	2,08	1,44

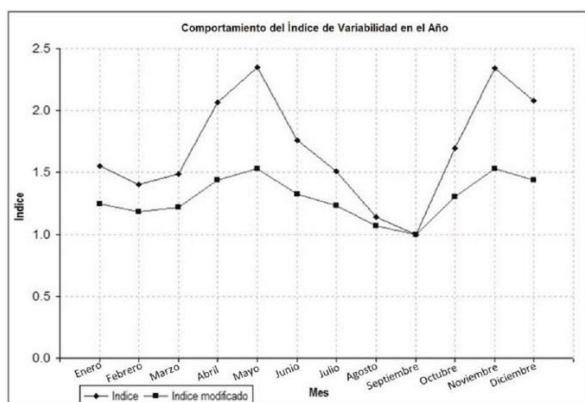


Fig. 2. Índice obtenido a partir del caudal medio multianual Estación Limnigráfica Mateguadua - Periodo: 1975-1995.

3. RESULTADOS

3.1. Cálculo del RQA

Una vez obtenido el índice de variabilidad y el índice de variabilidad modificado, los caudales base para la media móvil de 15 días (MM15) y la media móvil de 40 días (MM40), se puede determinar el RQA multiplicando el índice de cada mes por el caudal base. En la Fig. 3, se muestra la variabilidad que presenta cada uno de los regímenes de caudales obtenidos, y en la Tabla 3 se presenta el porcentaje de cada uno de los RQA propuestos en relación con el caudal medio multianual (QMA). En la misma tabla se observa que el RQA con mayor caudal lo representa el encontrado a partir del Q_{bas} : $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ sin aplicar el índice modificado. Los caudales propuestos con el anterior régimen constituyen el 80% del QMA, lo que implica que se dejaría para el uso consuntivo, en promedio, el

20% restante. La Fig. 3 muestra cómo el RQA estimado con el índice modificado atenúa la variabilidad en el régimen de caudal, mostrando una curva más suave y poco representativa del régimen natural del río. Se considera que el RQA determinado a partir del Q_{bas} : $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y el índice de variabilidad sin modificar (RQA2), representa el régimen de caudal ambiental más adecuado a usar, dado que muestra la variabilidad intranual representativa del río Tuluá y no constituye un porcentaje demasiado alto del QMA. Para establecer si el RQA propuesto es adecuado, se realizó una valoración hidráulica del mismo en secciones transversales sobre el río, incluyendo el efecto que el RQA produce sobre la disponibilidad del hábitat.

MM40: RQA1 propuesto con Q_{bas} : $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ y el índice de variabilidad sin modificar.

MM15: RQA2 propuesto con Q_{bas} : $5,40 \text{ m}^3/\text{s}$ y el índice de variabilidad sin modificar.

MM40_raíz: RQA3 propuesto con Q_{bas} : $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ y el índice de variabilidad modificado.

MM15_raíz: RQA4 propuesto con Q_{bas} : $5,40 \text{ m}^3/\text{s}$ y el índice de variabilidad modificado.

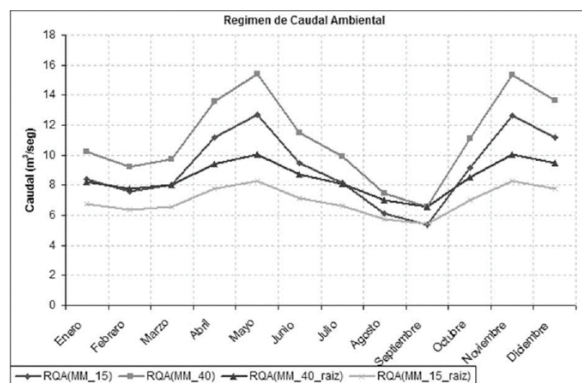


Fig. 3. Régimen de caudal con MM 40 y MM 15

Estación Limnigráfica Mateguadua - periodo: 1975-1995.

Según Baeza et ál [18], el potencial de supervivencia de las poblaciones y especies se reduce si el sistema se comporta fuera del rango de variación natural. De esta manera, una vez especificado el régimen de caudal ambiental para considerar, se plantea una mejora a la metodología, mediante la propuesta de un rango de variación del régimen planteado, de tal forma que varíe según las condiciones climáticas impuestas naturalmente, y que esa variación se conserve dentro de los límites his-

Tabla 3. Porcentaje que representa el RQA con respecto a los caudales medios multianuales.
Estación Limnigráfica Mateguadua - periodo: 1975-1995.

QMA*	MM40	MM15	MM40_ raiz	MM15_ raiz	%MM40/ QMA	%MM15/ QMA	%MM40_ raiz/QMA	%MM15_ raiz/QMA
13,02	10,20	8,39	8,18	6,73	78,3	64,5	62,8	51,7
11,74	9,20	7,57	7,77	6,39			66,2	54,5
12,45	9,76	8,03	8,00	6,59			64,3	52,9
17,30	13,55	11,15	9,43	7,76			54,5	44,9
19,69	15,43	12,70	10,06	8,28			51,1	42,1
14,70	11,52	9,48	8,69	7,16			59,1	48,7
12,64	9,91	8,15	8,06	6,64			63,8	52,5
9,54	7,48	6,15	7,00	5,77			73,4	60,4
8,37	6,56	5,40	6,56	5,40			78,4	64,5
14,20	11,13	9,16	8,55	7,03			60,2	49,5
19,62	15,37	12,65	10,04	8,27			51,2	42,1
17,38	13,62	11,21	9,45	7,78			54,4	44,8

tóricos registrados. Dichos límites se definieron a partir de los coeficientes de variación mensual multianual. Para el río Tuluá, los límites de variación se establecieron al multiplicar el RQA propuesto por el coeficiente de variación que presentó cada mes en el registro histórico de caudales de 1975 – 1995. En la Tabla 4, se presentan los valores obtenidos del RQA establecido, el coeficiente de variación, el rango de variación (lim - y lim +) y los caudales mínimos y máximos (denotados por *min* y *max*) registrados en la serie histórica.

Como se observa en la Fig. 4, los límites del caudal propuesto están por debajo del caudal medio mensual multianual (QMA) y por encima, en algunos meses, de los mínimos históricos. Comportamiento deseable para un régimen de caudal ambiental. Como se observa en la Fig. 4, los límites del caudal propuesto están por debajo del caudal medio mensual multianual (QMA) y por encima, en algunos meses, de los mínimos históricos. Comportamiento deseable para un régimen de caudal ambiental.

Tabla 4. Régimen de caudal propuesto Qbas: 5,4 m³,s⁻¹.
Estación Limnigráfica Mateguadua - Periodo: 1975-1995.

Mes	Índice	RQA	CV (m ³ ,s ⁻¹)	Desvests	min	max	lim-	Lim+
Enero	1,56	8,39	0,55	4,62	4,10	26,90	4,10	13,02
Febrero	1,40	7,57	0,57	4,33	4,10	23,00	4,10	11,90
Marzo	1,49	8,03	0,50	4,02	3,40	25,90	4,01	12,05
Abril	2,07	11,15	0,43	4,74	6,80	32,60	6,80	15,90
Mayo	2,35	12,70	0,41	5,22	6,10	32,10	7,48	17,92
Junio	1,76	9,48	0,38	3,64	5,50	24,80	5,85	13,12
Julio	1,51	8,15	0,34	2,79	3,20	24,00	5,37	10,94
Agosto	1,14	6,15	0,30	1,85	2,20	15,80	4,31	8,00
Septiembre	1,00	5,40	0,32	1,73	1,90	13,10	3,66	7,13
Octubre	1,70	9,16	0,40	3,66	5,90	31,50	5,90	12,82
Noviembre	2,34	12,65	0,44	5,51	7,70	44,60	7,70	18,16
Diciembre	2,08	11,21	0,54	6,00	8,90	46,50	8,90	17,21
Qbas	5,40							

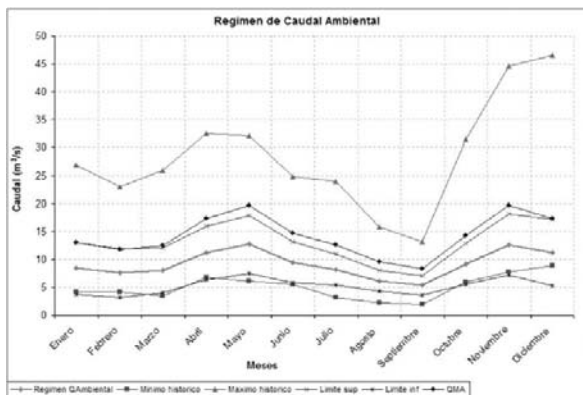


Fig. 4. Régimen de caudal ambiental y límites de manejo. Estación Limnigráfica Mateguadua - Periodo: 1975-1995.

3.2. Verificación de las condiciones de habitabilidad

Según Palau [17] en el método de QBM, la habitabilidad del tramo de un río se define como una función única de la profundidad o tirante hidráulico del cauce. El punto esencial entonces, es determinar cuál es la profundidad mínima que hay que mantener, para conservar el paisaje fluvial, especies o comunidades de fauna y vegetación bentónica, etc. Debido a la falta de datos biológicos que permita conocer el valor de profundidad requerida por las especies piscícolas del río Tuluá, se propuso trabajar con profundidades mínimas obtenidas a partir de un análisis de los tirantes con los caudales medios mínimos y mínimos históricos. En la Fig. 5 se muestra la profundidad en las 32 secciones transversales con el QMAmin y el Qminhist del mes de septiembre, mes en el cual se presentan las menores profundidades. Como se observa en la Fig. 5, la sección 22 presenta un comportamiento crítico, dado que su tirante es de 15 cm considerando el Qminhist y un tirante de 20 cm considerando los caudales medios mínimos históricos, QMAmin.

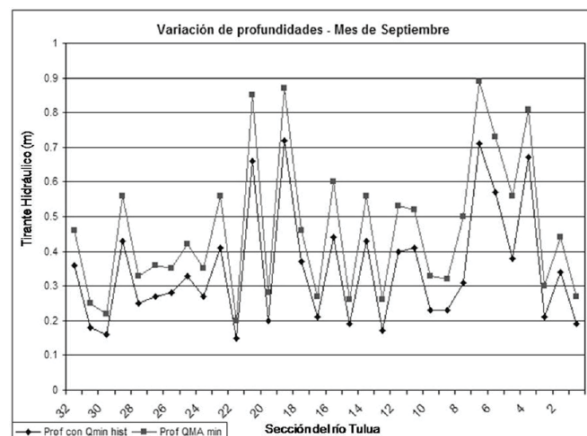


Fig. 5. Variación de la profundidad a lo largo del río para el mes de septiembre - QMA min y Q min hist. Estación Limnigráfica Mateguadua - Periodo: 1975-1995.

A partir del anterior análisis se definió que la profundidad mínima admisible en condiciones de régimen de caudal ambiental medio debe ser de aproximadamente 30 cm. Se hace referencia a un caudal ambiental medio, puesto que el RQA varía a lo largo del año y presenta rangos de variación máxima y mínima por mes, siendo consistente con el régimen climatológico de la zona. En el caso del río Tuluá, 30 cm no se considera un valor obligatorio en años secos o que presenten una variabilidad climática alta (años Fenómeno del Niño - ENOS). Establecer un RQA variable a lo largo del año debe ir acompañado de una evaluación flexible de la variación en las profundidades, dada su relación con la habitabilidad de las especies, pues como se observó en la Fig. 5 pueden existir niveles mínimos extremos en circunstancias naturales.

3.3. Simulación hidráulica con HEC - RAS

A partir de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología del QBM, se simuló en HEC-RAS un tramo con una longitud aproximada de 21 km, entre la estación Jardín Botánico (ubicada en la cuenca media del río Tuluá) y la desembocadura al río Cauca. Se estudiaron 32 secciones transversales, separadas entre tramos de longitudes que varían entre los 158 m y los 3300 m [19]. Se simuló en condición de flujo permanente con profundidad normal con pendiente promedio de

$S= 0,01586$ como condición de frontera aguas abajo. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de la simulación hidráulica de los RQA y la comparación de los mismos con los caudales

mínimos históricos ($Q_{minhist}$), caudales medios mínimos (QMA_{min}) y los caudales medios multianuales (QMA). El análisis se hizo tanto para la variación en caudal como en nivel.

Tabla 5. Análisis de la variación de caudal y nivel con el RQA propuesto.

Método	Caudal	Nivel
Qbas MM 40	El RQA propuesto (QBM MM 40) es inferior en un 22% (aprox.) a los QMA, pero superior en a los QMA min y $Q_{minhist}$. El RQA propuesto, representa un porcentaje alto del QMA comparado con los determinados por los métodos hidrológicos [20], pero conservador para aplicarlo al río en estudio puesto.	La variación del nivel con el RQA propuesto, comparado con el QMA es del orden de 1 cm hasta los 19 cm, donde las reducciones de nivel son mayores en algunos meses de verano e invierno en secciones poco anchas (menores de 20 m) y con profundidades menores a los 30 cm (sección 29 y sección 1).
Qbas MM 15	El RQA elaborado con el QBM MM 15, es inferior en un 36% (aprox.) de QMA, pero superior en un alto porcentaje a los QMA min y $Q_{minhist}$ (26 % al 554 % aprox). El RQA propuesto es alto, comparado con los determinados con la mayoría de los métodos hidrológicos [20].	La variación del nivel con el RQA propuesto comparado con el QMA es del orden de 3 cm hasta los 27 cm. Las secciones que se ven menos afectadas con la reducción de caudal son la sección 25 y 27, las cuales presentan un ancho que supera los 20 m. Las secciones donde la reducción de nivel (sección 8, 11, 12, 21, 29, etc) es elevada comparada con el QMA, fueron aquellas con anchos entre 10 y 20 m.

Respecto a la condición de profundidad mínima, definida en 30 cm, los dos RQA propuestos con MM15 y MM40, presentan en todas las secciones transversales estudiadas un tirante superior a los 30 cm, situación que garantizará las condiciones mínimas de habitabilidad de las especies icéticas del río.

3.4. Análisis del RQA propuesto y la demanda por uso de agua sobre el río Tuluá

Para determinar si el RQA propuesto satisface la demanda hídrica actual, se hizo un análisis de las derivaciones y aportes que recibe el río Tuluá dentro del tramo comprendido entre el Jardín Botánico, hasta la desembocadura al río Cauca. A partir de lo anterior, se hizo un análisis de los caudales disponibles en condiciones de caudal medio (QMA) para verificar si los usos consuntivos actuales en el río Tuluá se encontraban en el rango determinado para el RQA propuesto por la metodología del Caudal Básico de Mantenimiento. La

estimación de caudales por cada tramo (Tabla 6) se estimó a partir de la información que la CVC tiene de usos consuntivos en la zona [21] además de los registros medios en la estación Mateguadua.

Los caudales disponibles en condiciones medias (Tabla 6) cumplen con el RQA propuesto y su rango de variabilidad (Tabla 4). El RQA y el rango de variación propuesto permiten satisfacer las necesidades actuales en el río Tuluá en cantidad, pero no necesariamente en calidad de agua. Los dos últimos tramos del río reciben descargas de agua residual que hacen inadecuada cualquier aplicación de metodologías para determinar el caudal ambiental [19], [22], ya que el problema sale de las competencias de la metodología y pasa a ser un problema de dilución y de políticas de saneamiento. El establecimiento de un caudal ambiental, supone una condición previa de aguas no contaminadas, pues para un río en alto grado de alteración en calidad, no habrá suficiente agua que permita diluir altas cargas contaminantes.

Tabla 6. Caudales disponibles en el río Tuluá, en condiciones medias [21].

Mes/Estación	Jardín Botánico – Barrio Justicia (1) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Barrio Justicia – Puente Nuevo (2) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Puente Nuevo – Después Urb Maracaibo (3) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Después Urb Maracaibo – Puente Papayal (4) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Enero	8,51	8,65	9,02	8,88
Febrero	7,22	7,37	7,74	7,60
Marzo	7,94	8,08	8,45	8,32
Abril	12,78	12,92	13,30	13,16
Mayo	15,18	15,32	15,69	15,55
Junio	10,19	10,33	10,71	10,57
Julio	8,13	8,27	8,64	8,51
Agosto	5,03	5,17	5,54	5,41
Septiembre	3,86	4,00	4,37	4,24
Octubre	9,69	9,83	10,21	10,07
Noviembre	15,11	15,25	15,62	15,49
Diciembre	12,87	13,01	13,38	13,24

El análisis anterior también se realizó estimando el caudal mensual en cada tramo a partir de los usos consuntivos, los cuales son constantes a lo largo del año, y el caudal medio mínimo. En estas condiciones, el caudal obtenido se encuentra por debajo del RQA propuesto. Ésta es una situación crítica en el río que puede agravar las condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas, la calidad del agua y los servicios provistos por los ecosistemas.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se estableció el RQA para el río Tuluá en Mateguadua y adicionalmente un rango de variación, definido como el caudal ambiental ± 1 desviación estándar. El cálculo de dichos valores se hizo con el objeto de determinar un rango de variación del régimen de caudal propuesto, así el RQA puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas y no se restringe a un único valor mensual. Lo que se propuso fue determinar un límite superior e inferior al régimen de caudal ambiental propuesto, estos límites estarían definidos por los coeficientes de variación mensuales multianuales (en la serie histórica) que servirían como metas de manejo, sin restringir el uso del agua y sin exigir, en algunos casos, más agua de la que en realidad está pasando por el río. El régimen de caudal puede variar dependiendo de las condi-

ciones climáticas que se presenten, y no pretender establecer un régimen de caudal estricto, que en algunas épocas del año será difícil de mantener.

La mayoría de metodologías hidrológicas proponen valores fijos constantes de QA para todo el año, sin tener en cuenta la variación hidrológica de las cuencas hidrográficas. Para evitar caer en este error y dar un enfoque más amplio a la propuesta de un RQA para el río Tuluá, se analizaron factores de tipo hidráulico, ligados a la habitabilidad en el río, y el factor de calidad del agua.

Aunque en este trabajo la habitabilidad de un tramo se considera una función única de la profundidad mínima en el río, se recomienda realizar estudios biológicos in situ de aquellas especies relevantes o prioritarias, incluyendo las poblaciones de macroinvertebrados, bentos, fitoplancton, etcétera.

El RQA propuesto cumple en cuanto a la variabilidad y cantidad propia de un régimen hidrológico natural. Sin embargo, el monitorio en el río debería incluir no solo el registro diario de caudal, sino también biológico y de calidad de agua. El establecimiento de un régimen de caudal ambiental requiere adicionalmente un manejo adecuado de las aguas residuales que se producen en las poblaciones ribereñas y que terminan en las partes

bajas de los ríos.

La bondad de este método para comparar y concluir desde diferentes ramas del conocimiento, es un incentivo para su puesta en práctica, teniendo en cuenta que no requiere de altos costos para su implementación. Adicionalmente, el análisis que permite realizar es más completo que el permitido por la mayoría de las metodologías hidrológicas, ubicándolo en un punto intermedio entre las metodologías hidrológicas y las biológicas, dando un paso hacia adelante en materia de determinación e implementación de RQA en Colombia. Con este método se busca aportar una herramienta que ayude a las autoridades ambientales en la toma de decisiones para conocer asignaciones, cobro de tasa por uso del agua, licencia de construcción de obras

hidráulicas, etc.

5. FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y a la Universidad del Valle por la financiación del proyecto “Metodología para la Determinación del Régimen de Caudal Ambiental en el Río Tulua – Subcuenca del Río Cauca”, en la modalidad de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2005. Agradecemos a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y el IDEAM, entidades que brindaron la información hidrológica utilizada en el estudio.

REFERENCIAS

- [1] Y. Carvajal, “Régimen de caudal ambiental en el marco de la gestión integrada de cuencas hidrográficas”, En: *Caudal Ambiental Conceptos, Experiencias y Desafíos*. Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle, 2009.
- [2] J. Baron, *Ecosistemas de agua dulce. Tópicos en Ecología*. No. 10, USA, 2003.
- [3] M. Gómez, P. Loné y J. Canga, “El régimen de caudales medioambientales. Su cálculo en la cuenca del Guadiana”, *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 2000. [En línea]. N° 51. La Gestión del Agua, Vol II. España. Disponible en: http://hispagua.cedex.es/documentacion/revistas/op/51/op51_8.htm.
- [4] L. Castro y Y. Carvajal, “Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental”, *Revista Ingeniería y Universidad, Universidad Javeriana*, 2006. [En línea]. N° 2. Vol 10. Colombia, [en línea]. Disponible en: http://ingenierias.javeriana.edu.co/portal/page?_pageid=233,846441,233_846446&_dad=portal&_schema=PORTAL&tab=publicaciones
- [5] J. M. Díez, *Metodologías para la estimación de Caudales Ecológicos*. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. España, 2000.
- [6] R. Tharme, *A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers*. South Africa, 2003.
- [7] R. Pyrcce, “Hydrological Low Flow Indices and their Uses”. *Watershed Science Centre. Trent University, Canada*, 2000. [en línea]. Disponible en: <http://www.trentu.ca/wsc>.
- [8] A. Arthington and J. Zalucki, *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods*, LWRRDC Occasional Paper 27. 1998.
- [9] L. Castro y Y. Carvajal, “Metodologías para determinar caudal ambiental”. En: *Caudal Ambiental Conceptos, Experiencias y Desafíos*. Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle, 2009.
- [10] A. Palau, *Proposta per l'establiment de cabals de manteniment en aprofitaments-hidràulics de l'àmbit hidrogràfic de Catalunya*. Dep. Medi Ambient Generalitat de Catalunya, 1993.
- [11] A. Palau. (1994), “Los mal llamados cau-

- dales 'ecológicos'. Bases para una propuesta de cálculo", *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos* [En línea]. N° 28. España, [en línea]. Disponible en: http://hispagua.cedex.es/documentacion/revistas/op/28/op28_8.htm.
- [12] B. Richter, J. Baumgartner, J. Powell and D. Braun, *A Method for Assessing Hydrologic Alteration Within Ecosystems. Conservation Biology*, 10. 1163-1174. 1996.
- [13] B. Richter, J. Baumgartner and D. Braun, "How much water does a river need?" En: *Freshwater Biology*, vol 37, pp. 231 - 249, 1997.
- [14] A. Palau and J. Alcazar, "The Basic Flow: An Alternative Approach to Calculate Minimum Environmental Instream Flows", *Proceedings of 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*, Canadá, 1996.
- [15] L. Castro y Y. Carvajal, "Análisis exploratorio y cuantitativo para determinar la estacionariedad de las series hidrometeorológicas", *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Popayán 13 y 14 de septiembre de 2006. Colombia.
- [16] G. Poveda, "Efecto del ENSO y la NAO sobre el ciclo anual de la hidrología de Colombia: análisis de correlación, reanálisis de NCEP/NCAR y modelos de pronóstico", *Avances en Recursos Hidráulicos*, 5, Colombia, 1998.
- [17] CEDEX, "Metodología de cálculo de regímenes de caudales de mantenimiento", *Realización del asesoramiento técnico en temas ambientales relacionados con las obras hidráulicas*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente, 1998.
- [18] D. Baeza, F. Martínez y D. García, "Variabilidad temporal de caudales: aplicación a la gestión de ríos regulados", *Revista Ingeniería del Agua*, vol. 10, N° 4. Dic, 2003.
- [19] Corporación Regional del Valle del Cauca, CVC: 2004: *Estudio de la calidad del agua del río Cauca y sus principales tributarios mediante la aplicación de índices de calidad y contaminación tramo Salvajina – La Virginia*, vol. 10. Fase II. Santiago de Cali, Colombia, 2004.
- [20] L. Castro y Y. Carvajal, "Evaluación de los métodos hidrológicos para la determinación de caudales ambientales en el río Tuluá, Colombia", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XXIII, Oct. - Dic, 2008.
- [21] Corporación Regional del Valle del Cauca, CVC. 2005: *Caracterización y modelación de la calidad del agua del río Tuluá. Tramo Jardín Botánico – antes desembocadura*, vol. 1. Dirección Técnica Ambiental.
- [22] Corporación Regional del Valle del Cauca, CVC: 2002: *Plan de Gestión Ambiental Regional del Valle del Cauca 2002-2012: "Participación con Compromiso"*. Santiago de Cali, Colombia, 2003.